

В. С. СОРОКИН, Б. Л. АНТИПОВ, Н. П. ЛАЗАРЕВА

МАТЕРИАЛЫ И ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

УЧЕБНИК

В двух томах

Том 1

ПРОВОДНИКИ, ПОЛУПРОВОДНИКИ, ДИЭЛЕКТРИКИ

Допущено

Учебно-методическим объединением по образованию в области радиотехники, электроники, биомедицинской техники и автоматизации в качестве учебника для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки бакалавров, магистров и специалистов 210100 «Электроника и микроэлектроника»



Москва
Издательский центр «Академия»
2006

УДК 621.3:621.315.5(075.8)

ББК 32.843.3я73

С654

Рецензенты:

зав. кафедрой «Физика твердого тела» Воронежского государственного университета, проф., д-р физ.-мат. наук *Ю. Е. Калинин*;
проф. кафедры «Прикладная физика и оптика твердого тела» Санкт-Петербургского политехнического университета, д-р физ.-мат. наук *С. А. Немов*

Сорокин В. С.

С654 Материалы и элементы электронной техники. В 2 т. Т. 1. Проводники, полупроводники, диэлектрики : учебник для студ. высш. учеб. заведений / В. С. Сорокин, Б. Л. Антипов, Н. П. Лазарева. — М. : Издательский центр «Академия», 2006. — 448 с.

ISBN 5-7695-2785-4

Рассмотрены физические процессы и явления, протекающие в проводниках, полупроводниках и диэлектриках. Выявлены основные закономерности изменения свойств в зависимости от состава веществ и внешних возмущающих факторов. Проведен анализ электрических и магнитных свойств материалов в тесной взаимосвязи с их внутренним строением и практическим применением в приборах и устройствах электронной техники. Значительное внимание уделено новым материалам электроники: высокотемпературным сверхпроводникам, полупроводниковым твердым растворам и сверхрешеткам на их основе, фуллеренам и углеродным нанотрубкам, аморфным полупроводниковым материалам и металлическим сплавам.

Для студентов высших учебных заведений.

УДК 621.3:621.315.5(075.8)

ББК 32.843.3я73

Оригинал-макет данного издания является собственностью Издательского центра «Академия», и его воспроизведение любым способом без согласия правообладателя запрещается

© Сорокин В. С., Антипов Б. Л., Лазарева Н. П., 2006

© Образовательно-издательский центр «Академия», 2006

ISBN 5-7695-2785-4 (т. 1)

ISBN 5-7695-2786-2

© Оформление. Издательский центр «Академия», 2006

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Обозначения основных величин	5
Введение	9
Глава 1. Основные сведения о строении веществ	13
1.1. Классификация материалов	13
1.2. Строение атомов	15
1.3. Основные виды химической связи	21
1.4. Особенности строения твердых тел	31
1.5. Элементы зонной теории твердого тела	40
Глава 2. Физические процессы и явления в проводниковых материалах	51
2.1. Общие сведения о проводниках	51
2.2. Физическая природа электропроводности металлов	52
2.3. Температурная зависимость удельного сопротивления металлических проводников	60
2.4. Влияние примесей и других структурных дефектов на удельное сопротивление металлов	65
2.5. Электрические свойства металлических сплавов	70
2.6. Сопротивление проводников на высоких частотах	73
2.7. Сопротивление тонких металлических пленок. Размерные эффекты	76
2.8. Контактные явления и термоэлектродвижущая сила	80
2.9. Эмиссионные свойства металлов	85
Глава 3. Основные свойства и применение проводниковых материалов	92
3.1. Классификация проводниковых материалов	92
3.2. Материалы высокой проводимости	93
3.3. Сверхпроводящие металлы и сплавы	99
3.4. Материалы высокотемпературной сверхпроводимости	113
3.5. Сплавы высокого сопротивления и сплавы для термопар	119

3.6. Аморфные металлические сплавы	124
3.7. Фуллерены, фуллериды, графит и другие модификации углерода	131
3.8. Композиционные и оксидные проводящие материалы	142

Глава 4. Физические процессы и явления в полупроводниковых материалах

4.1. Общие сведения о полупроводниках	146
4.2. Собственные и примесные полупроводники. Основные и неосновные носители заряда	147
4.3. Температурная зависимость концентрации носителей заряда	158
4.3. Механизмы рассеяния и подвижность носителей заряда в полупроводниках	164
4.5. Температурная зависимость удельной проводимости полупроводников	168
4.6. Неравновесные носители заряда и механизмы рекомбинации	171
4.7. Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниках	180
4.8. Электропроводность полупроводников в сильном электрическом поле	195

Глава 5. Основные свойства, особенности технологии и применение полупроводниковых материалов

5.1. Классификация полупроводниковых материалов	205
5.2. Кремний	208
5.3. Германий	232
5.4. Карбид кремния	240
5.5. Полупроводниковые соединения типа $A^{III}B^V$	246
5.6. Твердые растворы на основе соединений $A^{III}B^V$	263
5.7. Полупроводниковые сверхрешетки	274
5.8. Полупроводниковые соединения типа $A^{II}B^{VI}$	279
5.9. Полупроводниковые соединения типа $A^{IV}B^{VI}$	286
5.10. Гидрогенизированный аморфный кремний	291

Глава 6. Физические процессы и явления в диэлектрических материалах

6.1. Общие сведения о диэлектриках	301
6.2. Поляризация диэлектриков	301
6.3. Поляризация и агрегатные состояния диэлектриков	315
6.4. Токи смещения и электропроводность диэлектриков	322
6.5. Диэлектрические потери	333
6.6. Пробой газов и жидких диэлектриков	346

6.7. Пробой твердых диэлектриков	358
Глава 7. Основные свойства, особенности технологии и применение диэлектриков	371
7.1. Классификация диэлектриков	371
7.2. Основные сведения о строении и свойствах органических полимеров.....	374
7.3. Линейные полимеры	388
7.4. Композиционные порошковые пластмассы и слоистые пластики	396
7.5. Неорганические стекла	399
7.6. Ситаллы	412
7.7. Керамические диэлектрики	414
Приложения.....	428
Приложение 1	428
Приложение 2	431
Приложение 3	434

ПРЕДИСЛОВИЕ

Само название дисциплины «Материалы и элементы электронной техники» обуславливает деление книги на две относительно самостоятельные части: материалы и элементы, при этом явный приоритет в распределении объема (10 из 15 глав) отдается материалам, поскольку последние являются ключевым звеном в цепи научно-технического прогресса, определяющим успех многих инженерных решений при создании сложнейшей электронной аппаратуры. Всегда создание новых материалов и открытие в них новых физических эффектов и явлений приводило к созданию новых приборов и устройств, в которых использовались эти явления.

С учетом общепринятой классификации материалов в первом томе учебника выделяются разделы, посвященные классам проводниковых, полупроводниковых и диэлектрических материалов. Им предшествует вводная глава, направленная в основном на изучение видов химической связи, особенностей строения различных материалов и энергетического спектра электронных состояний как в отдельных атомах, так и в веществах с регулярной кристаллической решеткой. Особое внимание к кристаллическим веществам обусловлено их определяющей ролью на современном этапе развития электроники.

Принятая в учебнике последовательность изучения различных классов материалов, по мнению авторов, позволяет лучше выстроить систему логических связей, введение и обоснование новых понятий, терминов и определений. Знакомство с каждым новым классом материалов начинается с раскрытия физической сущности процессов и явлений, происходящих в веществах под действием внешнего поля, а затем на базе сформированного физического фундамента проводится анализ характерных свойств материалов и рассматриваются наиболее важные области их практического применения в приборах и устройствах электронной техники. Без предварительного изложения физики явлений невозможно научить будущего инженера адекватно оценивать свойства материалов и правильно применять их в конкретных условиях эксплуатации.

Во втором томе учебника рассматриваются активные диэлектрики, магнитные материалы и элементы электронной техники:

резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, а также соединительные и коммутационные элементы. Необходимо отметить, что в учебной литературе по электронике перечисленным пассивным элементам уделено неоправданно малое внимание. Издание предлагаемого учебника позволит в большей степени заполнить существующую нишу.

В учебнике большое внимание уделено рассмотрению контактных свойств металлов, оптических свойств полупроводников, явлений пробоя в различных диэлектриках, анализу свойств кремния, соединений $A^{III}B^V$, $A^{II}B^{VI}$, изовалентных твердых растворов на их основе. В большом объеме представлены сведения по стеклам, керамике, активным диэлектрикам и магнитотвердым материалам. В отдельный подраздел выделены оптически активные среды. С учетом достижений последних лет в учебник включены разделы, посвященные материалам высокотемпературной сверхпроводимости, фуллеренам, аморфным металлическим сплавам, гидригенизированному аморфному кремнию, полупроводниковым сверхрешеткам и др.

Авторский коллектив приносит искреннюю благодарность проф. Г. Ф. Глинскому за ценные советы и консультации по некоторым вопросам физики твердого тела.

ОБОЗНАЧЕНИЯ ОСНОВНЫХ ВЕЛИЧИН

- A — молярная (атомная) масса; массовое число элементов; обменный интеграл
 a — период кристаллической решетки; расстояние между атомами; ускорение; поляризационная константа; ширина канавки
 a_0 — боровский радиус
 B — магнитная индукция
 C — емкость; молярная теплоемкость
 $C_{\text{ном}}$ — номинальная емкость конденсатора
 C_V — константа Верде
 c — скорость света в вакууме; удельная объемная теплоемкость
 $c_{\text{уд}}$ — удельная емкость конденсатора
 D — электрическая индукция; коэффициент диффузии
 d — плотность; пьезомодуль; ширина; диаметр
 E — напряженность электрического поля
 $E_{\text{кр}}$ — критическая напряженность электрического поля
 $E_{\text{пр}}$ — электрическая прочность материала
 E_c — коэрцитивная сила в сегнетоэлектриках
 e — заряд электрона; мгновенное значение ЭДС
 $e_{\text{т}}$ — ЭДС теплового шума
 F — сила; функция распределения частиц; вероятность события; вероятность безотказной работы
 F_L — сила Лоренца
 f — частота
 G — коэффициент энергетической чувствительности термистора
 g — скорость генерации носителей заряда
 g_0 — скорость оптической генерации носителей заряда
 H — напряженность магнитного поля
 $H_{\text{св}}$ — критическая напряженность магнитного поля для сверхпроводников
 H_c — коэрцитивная сила в магнитных материалах
 h — постоянная Планка; толщина
 I — сила тока; интенсивность света
 $I_{\text{св}}$ — критическая сила тока для сверхпроводников
 $I_{\text{ут}}$ — ток утечки
 $I_{\text{ф}}$ — плотность потока фотонов; фототок
 i — мгновенное значение тока
 J — плотность тока
 J_m — намагниченность вещества

- K — константа магнитной анизотропии; координационное число
- K_p — коэффициент реверсивной нелинейности
- $K_{\text{эф}}$ — коэффициент эффективной нелинейности
- K_B — коэффициент магнитной чувствительности магниторезистора
- k — постоянная Больцмана; волновое число
- $k_{\text{упр}}$ — коэффициент упругой связи
- k_m — магнитная восприимчивость
- L — индуктивность; длина; орбитальный момент количества движения
- $L_{\text{ном}}$ — номинальная индуктивность катушки
- L_D — диффузионная длина носителей заряда
- L_0 — число Лоренца
- l — длина; расстояние; азимутальное квантовое число
- $\bar{l}$ — средняя длина свободного пробега электронов
- M — магнитный момент
- m — масса; магнитное квантовое число
- m_n — эффективная масса электрона
- m_p — эффективная масса дырки
- m_0 — масса свободного электрона
- N — число частиц; концентрация примесей; эффективная плотность состояний; число витков
- N_0 — число Авогадро
- n — концентрация электронов; показатель преломления; главное квантовое число; степень полимеризации; коэффициент трансформации
- n_0 — равновесная концентрация электронов
- n_i — собственная концентрация носителей заряда
- P — поляризованность; концентрация примесей; мощность; импульс (количество движения)
- P_a — активная мощность
- P_d — диэлектрические потери
- P_r — потери на гистерезис
- $P_{\text{в.т}}$ — потери на вихревые токи
- $P_{\text{ном}}$ — номинальная мощность элемента
- P_p — реактивная мощность
- $P_{\text{сп}}$ — спонтанная поляризованность
- P_s — поляризованность насыщения
- p — концентрация дырок; электрический (дипольный) момент; давление; пьезоэлектрический коэффициент
- p_0 — равновесная концентрация дырок
- $p_{\text{уд}}$ — удельная мощность рассеяния (удельные потери)
- Q — электрический заряд; добротность
- q — элементарный электрический заряд; уровень качества
- $q_{\text{уд}}$ — удельный заряд конденсатора
- R — активное сопротивление; универсальная газовая постоянная; коэффициент отражения
- $R_{\text{из}}$ — сопротивление изоляции
- R_k — контактное сопротивление
- $R_{\text{ном}}$ — номинальное сопротивление резистора
- R_c — критическая скорость охлаждения
- R_s — поверхностное сопротивление

- $R_{\square}$ — сопротивление квадрата поверхности
 r — активное сопротивление; скорость рекомбинации; радиус; расстояние; электрооптические коэффициенты
 S — площадь; сечение рассеяния носителей заряда
 s — спиновое квантовое число
 T — температура
 T_K — температура Кюри
 $T_{кр}$ — температура кристаллизации
 $T_{пл}$ — температура плавления
 T_c — температура стеклования
 $T_{св}$ — критическая температура перехода в состояние сверхпроводимости
 t — время; шаг спирали
 U — разность потенциалов; электрическое напряжение
 $U_{ном}$ — номинальное напряжение элемента
 $U_{пр}$ — напряжение пробоя
 $U_{\lambda/2}$ — полуволновое напряжение
 u — скорость теплового движения частиц; мгновенное значение напряжения
 V — объем
 v — скорость дрейфа; скорость движения электрона по орбите; скорость движения доменных границ
 $v_{зв}$ — скорость движения звуковой волны
 w — число витков
 x — мольная (атомная) доля компонента
 x_C — емкостное сопротивление элемента
 x_L — индуктивное сопротивление элемента
 Z — полное сопротивление (импеданс) цепи (элемента); относительный заряд ядра
 α — показатель оптического поглощения; температурный коэффициент; коэффициент удельной термоЭДС; поляризуемость атомов (молекул); температурный коэффициент потерь
 $\alpha_{и}$ — коэффициент ударной ионизации
 β — коэффициент импульса; коэффициент нелинейности вольт-амперной характеристики
 γ — удельная проводимость
 Δ — глубина проникновения электромагнитного поля в материал
 Δa — амплитуда тепловых колебаний атомов
 $\Delta H_{\perp}$ — ширина линии ферромагнитного резонанса
 Δn — избыточная концентрация электронов
 Δp — избыточная концентрация дырок
 $\Delta \gamma$ — фотопроводимость
 $\Delta \mathcal{E}$ — ширина запрещенной зоны
 $\Delta \mathcal{E}_a$ — энергия ионизации акцепторов
 $\Delta \mathcal{E}_в$ — разрыв валентной зоны
 $\Delta \mathcal{E}_д$ — энергия ионизации доноров
 $\Delta \mathcal{E}_с$ — разрыв зоны проводимости
 $2\Delta \mathcal{E}_{св}$ — энергетическая щель в сверхпроводниках
 δ — угол диэлектрических потерь; толщина; относительная деформация
 δ_m — угол магнитных потерь

ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость
 ϵ_r — реверсивная диэлектрическая проницаемость
 $\epsilon_{\text{эф}}$ — эффективная диэлектрическая проницаемость
 ϵ_0 — электрическая постоянная
 $\tilde{\epsilon}$ — комплексная диэлектрическая проницаемость
 ϵ'' — коэффициент диэлектрических потерь
 η — квантовый выход; коэффициент выпуклости кривой размагничивания; коэффициент полезного действия, КПД
 θ — объемная доля; характеристическая температура
 θ_d — температура Дебая
 θ_F — угол фарадеевского вращения
 θ_p — парамагнитная точка Кюри
 Λ — длина звуковой волны
 λ — длина волны; интенсивность отказов
 λ_t — удельная теплопроводность
 λ_s — константа магнитострикции
 μ — относительная магнитная проницаемость; подвижность носителей заряда
 μ_B — магнетон Бора
 $\mu_{\text{нач}}$ — начальная магнитная проницаемость
 $\mu_{\text{рев}}$ — реверсивная магнитная проницаемость
 μ_n — подвижность электронов
 μ_p — подвижность дырок
 μ_0 — магнитная постоянная
 $\tilde{\mu}$ — комплексная магнитная проницаемость
 μ'' — вязкая магнитная проницаемость
 ν — частота
 Π — периметр
 ρ — удельное сопротивление
 ρ_S — удельное поверхностное сопротивление
 ρ_V — удельное объемное сопротивление
 σ — механическое напряжение; коэффициент теплопередачи; электропроводность
 τ — время релаксации; время жизни неравновесных носителей заряда; характеристическое время
 τ_n — время жизни электронов
 τ_p — время жизни дырок
 τ_0 — время свободного пробега электронов
 Φ — магнитный поток; работа выхода электронов
 Φ_0 — квант магнитного потока (флюксонид)
 ϕ — потенциал; угол сдвига фаз; угловое перемещение контакта
 ψ — магнитооптическая добротность; угол фазового запаздывания
 χ — диэлектрическая восприимчивость; электронное сродство; электроотрицательность
 ω — угловая частота
 $\mathcal{E}$ — энергия
 $\mathcal{E}_k$ — энергия магнитной кристаллографической анизотропии
 $\mathcal{E}_d$ — удельная энергия в зазоре магнита
 $\mathcal{E}_F$ — энергия (уровень) Ферми

Современный этап развития общества характеризуется все более возрастающим проникновением электроники во все сферы жизни и деятельности человека. Достижения в области электроники в значительной мере способствуют успешному решению сложнейших научно-технических проблем, повышению эффективности научных исследований, созданию новых видов машин и оборудования. Только благодаря качественным преобразованиям электронных средств стало возможным решение проблемы глобальной информатизации человеческого бытия, т.е. массовое производство компьютеров, повсеместное использование информационных технологий и управляющих систем, а также сетей на их основе.

Важной составляющей информатизации стали телекоммуникации, т.е. технические средства для локальной, региональной или всемирной передачи информации. Наряду с давно существующими радиосвязью и телевидением появились компьютерные системы активного массового обмена информацией. Среди таких систем наибольшую известность и признание получила всемирная сеть Интернет.

Дискретный (цифровой) принцип представления информации, принятый в информационных технологиях, широко внедряется в бытовую электронику (цифровые телевизоры, видеокамеры, фотоаппараты и т.п.), обеспечивающую многие жизненные потребности человека. Радикально изменилась промышленная и транспортная электроника, появились автономные системы навигации, а также системы управления подвижными объектами и технологическими процессами. Стремительно развиваются научное и медицинское приборостроение, техника военного и космического назначений.

Основными проблемами в развитии всех направлений электроники продолжают оставаться дальнейшая миниатюризация изделий, повышение их быстродействия, уменьшение энергопотребления, повышение качества и надежности электронного оборудования, снижение стоимости. Все эти проблемы наиболее эффективно решаются в рамках микроэлектроники, которая за последние 40 лет прошла путь от простейших гибридных до моно-

литных ультрабольших интегральных схем, содержащих до 10^9 элементов. Здесь важно отметить, что микроминиатюризация не является целью микроэлектроники, а в действительности представляет собой единственную возможность создания сложной эффективно действующей электронной аппаратуры, содержащей большое число элементов.

Характерной особенностью технологии изготовления интегральных схем (ИС) является использование определенной последовательности групповых методов, разрешающая способность которых обуславливает предельные возможности интеграции элементов в схеме. Сложность и прецизионность таких процессов диктует исключение участия человека во всех важнейших стадиях проектирования и производства изделий, где он может стать источником случайных ошибок и вносимых загрязнений. В настоящее время на повестке дня стоит вопрос о создании электронных систем искусственного интеллекта и ЭВМ высокого уровня сложности, предназначенных для решения глобальных задач: прогнозирования погоды, предсказания земных катаклизмов, экологического мониторинга, рационального использования ресурсов планеты, расчета космических систем и др. Использование таких систем означает переход от обработки больших массивов информации к производству и восприятию новых знаний.

Среди стремительно развивающихся направлений электроники следует особо выделить оптоэлектронику. Последняя объединяет широкий класс функциональных электронных устройств, у которых в тракте передачи сигналов имеется оптическое звено. Оптическая связь характеризуется высокой информационной емкостью, помехозащищенностью, однонаправленностью, а также высокой избирательностью. Благодаря этому с помощью оптического канала связи можно концентрированно и с малыми потерями передавать электромагнитную энергию на большие расстояния в заданную область пространства. Использование оптического звена обеспечивает полную гальваническую развязку управляющих цепей от исполнительных при сохранении сильной функциональной связи между ними. Новый этап в развитии оптоэлектроники связан с освоением технологических приемов формирования полупроводниковых сверхрешеток и гетероструктур с квантово-размерными эффектами.

Развитие электроники оказало значительное влияние на состояние энергетики. В настоящее время кремниевые приборы силовой электроники находят массовое применение в энергоемких металлургических и химических производствах, на транспорте, в системах электропривода и энергоснабжения, а также при передаче электроэнергии на большие расстояния. С каждым годом расширяется номенклатура таких приборов. К мощным диодам и тиристорам добавилась широкая гамма мощных транзисторов и разно-

образных силовых интегральных схем. Оценки специалистов показывают, что оптимальное насыщение энергетики средствами полупроводниковой силовой электроники позволит сэкономить не менее 10 % всей производимой в мире электроэнергии.

Материальным воплощением любой идеи электроники являются изделия и устройства электронной техники. Любой такой прибор или устройство состоит из элементов, т. е. отдельных деталей, выполняющих определенные функции по отношению к электрическому сигналу или энергии. В аппаратуре отдельные элементы конструктивно и электрически объединены друг с другом в единый узел в соответствии с принципиальной электрической схемой, на которой каждый тип элемента имеет условное схемное изображение.

Различают пассивные и активные элементы электронной техники. *Пассивные элементы* служат для перераспределения токов, напряжений и энергии между отдельными участками электрических цепей. К ним относятся разного рода резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, а также соединительные и коммутационные элементы.

Активные элементы предназначены, прежде всего, для преобразования электрических сигналов или энергии. В качестве активных элементов применяются различные электронные лампы, кинескопы, умножители тока, фотоэлементы, полупроводниковые диоды, транзисторы, оптоэлектронные приборы, пьезоэлементы, ячейки сегнетоэлектрической и магнитной памяти, сверхпроводящие криотроны, пироэлектрические преобразователи, электреты, жидкокристаллические индикаторы, сенсорные элементы и др.

Многие элементы твердотельной электроники могут быть изготовлены как в *дискретном*, так и в *интегральном* исполнении. Дискретные элементы фактически можно рассматривать как компоненты электронной аппаратуры. Наиболее распространенными из таких компонентов являются интегральные микросхемы, относящиеся к изделиям микроэлектроники. Например, пленочные ИС содержат, как правило, только пассивные элементы и представляют собой чаще всего пленочные *RC*-электрические цепи, используемые в качестве фильтров и резистивных делителей напряжения.

В монолитных полупроводниковых ИС все активные и пассивные элементы формируют в тонком (5... 10 мкм) приповерхностном слое полупроводниковой пластины. Наиболее часто в качестве активных элементов в таких ИС используются планарные биполярные транзисторы и униполярные транзисторы со структурой металл — диэлектрик — полупроводник (МДП).

Электрические и эксплуатационные параметры элементов электронной техники и аппаратуры в целом во многом определяются

свойствами материалов, из которых они изготовлены. Главная особенность материалов, используемых в электронике, заключается в том, что их электрические свойства очень чувствительны к природе химической связи, к атомной и электронной структурам, наличию примесей и структурных дефектов, однородности их распределения вплоть до очень локальных объемов. Роль материалов в электронике велика, как ни в какой другой области техники. Не случайно, что именно материалы часто используются в качестве классификационного признака при определении многих важных направлений электроники. В этой связи можно назвать полупроводниковую электронику, диэлектрическую электронику, магнитоэлектронику, сверхпроводящую электронику, пьезотехнику и др.

Изучение физической природы свойств материалов, поиск принципиальных путей управления этими свойствами, а также оптимизация состава и структуры материалов в целях достижения наилучшего сочетания свойств составляют научную сущность любого материаловедения, в том числе и электронного.

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О СТРОЕНИИ ВЕЩЕСТВ**1.1. Классификация материалов**

Материалы, используемые в электронной технике (МЭТ), можно подразделить на функциональные и конструкционные. Под *функциональными* МЭТ следует понимать материалы, которые обеспечивают реализацию определенных функций в элементах электронной аппаратуры. При использовании таких материалов в приборах и устройствах электроники, в первую очередь, принимаются во внимание их электрические свойства. В качестве примеров функциональных МЭТ можно назвать резистивные, конденсаторные и электроизоляционные материалы, высокопроводящие и сверхпроводящие вещества, материалы для хранения и записи информации, материалы с нелинейными электрическими свойствами, материалы для активных элементов полупроводниковой электроники, таких как диоды, транзисторы, лазеры, фотодетекторы и др.

Конструкционными называются материалы, предназначенные для изготовления корпусов и деталей различных приборов и устройств электронной техники. Как правило, эти материалы выполняют вспомогательные функции, причем корпуса приборов и детали конструкций характеризуются большим разнообразием форм и размеров. К ним предъявляются прежде всего жесткие эксплуатационные, технологические и экономические требования.

По реакции на внешнее электрическое поле функциональные МЭТ принято подразделять на проводники, полупроводники и диэлектрики. Объективным критерием, по которому определяют принадлежность материала к той или иной группе, является *удельное электрическое сопротивление* ρ в нормальных условиях эксплуатации. Формально к проводникам относятся материалы с удельным электрическим сопротивлением $\rho < 10^{-5}$ Ом·м, а к диэлектрикам — материалы, у которых $\rho > 10^8$ Ом·м. При этом важно иметь в виду, что удельное сопротивление хороших проводников электрического тока может составлять всего лишь 10^{-8} Ом·м, а у лучших диэлектриков оно превосходит значения 10^{16} Ом·м. Удельное сопротивление полупроводников в зависимости от строения и состава материалов, а также от условий их эксплуатации может изменяться в очень широких пределах — от 10^{-5} до 10^8 Ом·м.

На практике многие материалы часто подвергаются одновременному воздействию как электрического, так и магнитного полей. По поведению в магнитном поле функциональные МЭТ классифицируются на слабомагнитные и сильномагнитные вещества (рис. 1.1). Последние иногда называют магнетиками. Подавляющее большинство функциональных материалов электроники относится к слабомагнитным веществам. Среди магнетиков также можно выделить вещества, хорошо проводящие электрический ток, наряду с материалами, совсем непроводящими. В зависимости от удельной проводимости различным оказывается частотный диапазон использования магнетиков.

Хорошими проводниками электрического тока являются металлы. Из 105 химических элементов лишь 24 являются неметаллами, причем 12 элементов могут проявлять полупроводниковые свойства. Но кроме элементарных веществ существуют тысячи химических соединений, сплавов или композиций, проявляющих свойства проводников, полупроводников или диэлектриков. Резкую границу между значениями удельного сопротивления материалов, относящимся к различным классификационным группам, провести достаточно сложно. Указанные ранее критерии в значительной мере условны. Одни и те же вещества в разных ситуациях могут проявлять различные электрические свойства. Например, проводимость полупроводников сильно зависит от содержания примесей, типа и концентрации структурных дефектов. Поэтому чи-

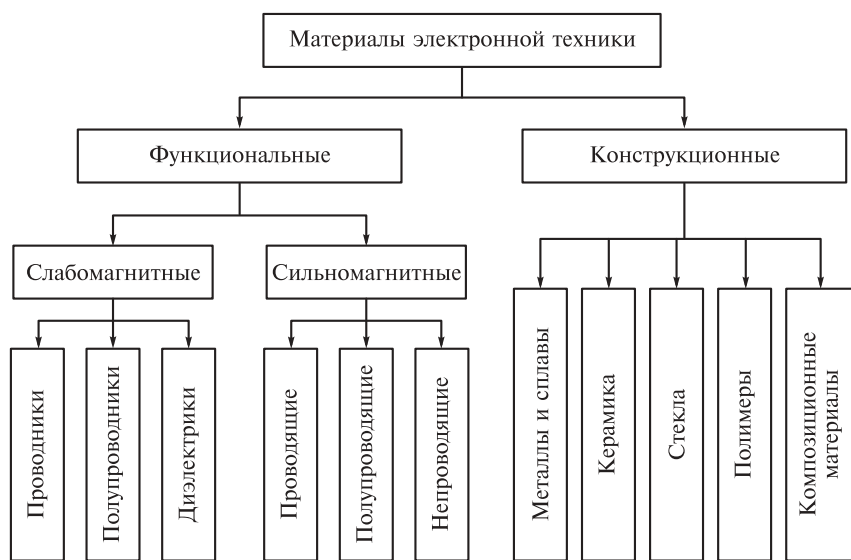


Рис. 1.1. Классификация материалов электронной техники

стые кристаллы алмаза являются прекрасными диэлектриками с весьма высоким удельным сопротивлением. Но при введении в такие кристаллы определенных примесей они приобретают полупроводниковые свойства.

Многие полупроводники при низких температурах ведут себя подобно диэлектрикам. В то же время диэлектрики при сильном нагревании могут проявлять свойства полупроводников. Качественное различие между материалами состоит в том, что для металлов проводящее состояние является основным, а для полупроводников и диэлектриков — возбужденным.

Развитие радиотехники потребовало создания диэлектриков, в которых специфические высокочастотные свойства сочетаются с необходимыми теплофизическими и физико-механическими характеристиками, а также с высоким удельным сопротивлением. Такие материалы получили название высокочастотных диэлектриков. Кроме того, в зависимости от функций, выполняемых диэлектриками в электронной аппаратуре, они подразделяются на активные и пассивные материалы. С помощью активных диэлектриков осуществляется преобразование различных сигналов и управление параметрами электрических цепей. К пассивным относятся электроизоляционные и конденсаторные материалы.

Круг конструкционных материалов, применяемых в электронике, также достаточно широк. Эти материалы можно классифицировать по разным признакам. В частности, их принято подразделять на конструкционные материалы общего назначения (универсальные) и конструкционные материалы со специальными свойствами (специализированные). На рис. 1.1 приведена одна из возможных классификаций конструкционных МЭТ по составу и особенностям технологического цикла.

Основные эксплуатационные требования к конструкционным материалам сводятся к достижению высокой конструкционной прочности изготавливаемых деталей и узлов, а также обеспечению устойчивого иммунитета к воздействию внешней среды. Под конструкционной прочностью понимают комплекс механических свойств, гарантирующих надежную и длительную эксплуатацию материала в заданных условиях.

1.2. Строение атомов

Имеются многочисленные и убедительные доказательства, что атомы любого вещества состоят из положительно заряженного ядра и окружающих его электронов. В свою очередь, ядро состоит из протонов и нейтронов. Нейтроны являются нейтральными частицами, поэтому заряд ядра определяется числом содержащихся в нем протонов. Масса электрона в 1 836 раз меньше массы протона

и нейтрона. Это означает, что практически вся масса атома сосредоточена в ядре. Вместе с тем размер ядра очень мал и сопоставим с размером электрона. Если ядро представить в виде шарика, то его радиус, м, можно довольно точно оценить по формуле

$$r = 1,3 \cdot 10^{-15} A^{1/3},$$

где A — массовое число элемента, т.е. суммарное число нуклонов в ядре.

Электроны заполняют оболочки атома, компенсируя положительный заряд протонов. Атом в целом является нейтральным образованием. Число электронов и протонов в атоме определяется порядковым номером химического элемента в Периодической системе элементов Д. И. Менделеева.

В простейшей планетарной модели атома, предложенной Э. Резерфордом, электроны вращаются по круговым орбитам относительно ядра (рис. 1.2, *а*). Условию сохранения радиуса r орбиты отвечает равновесие между центробежной силой, отбрасывающей электрон от ядра, и силой кулоновского притяжения:

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}, \quad (1.1)$$

где m — масса электрона; v — скорость движения электрона по орбите; Z — атомный номер; e — заряд электрона; Ze — заряд ядра; ϵ_0 — электрическая постоянная, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Полная энергия электрона $\mathcal{E}$ в атоме складывается из кинетической энергии движения по орбите $\mathcal{E}_k$ и потенциальной энергии $\mathcal{E}_n$, обусловленной полем протонов:

$$\mathcal{E} = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r}. \quad (1.2)$$

Характерная особенность потенциальной кривой $\mathcal{E}_n(r)$ заключается в сильном увеличении ее крутизны по мере уменьшения r . Совместное решение формул (1.1) и (1.2) позволяет показать, что при движении электрона в поле центральных сил полная и кинетическая энергии одинаковы по величине, но противоположны по знаку, причем каждая из них равна половине потенциальной энергии.

Основной недостаток планетарной модели Резерфорда заключается в ее противоречивости. С ее помощью не удалось объяснить стабильность атомной структуры. Согласно законам классической электродинамики периодическое движение электрона с центростремительным ускорением должно сопровождаться излучением электромагнитных волн, причем частота этого

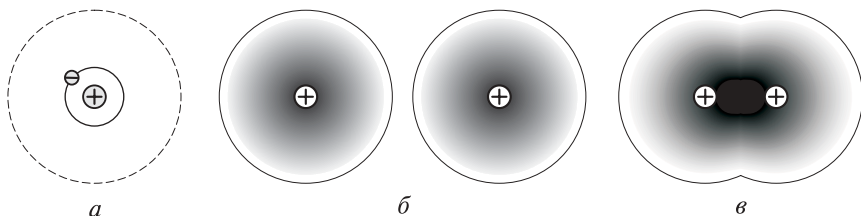


Рис. 1.2. Структура атома и молекулы водорода:

a — простейшая планетарная модель атома водорода (пунктиром показана разрешенная орбита электрона в возбужденном состоянии); *б, в* — квантово-механическая модель электронной структуры двух уединенных атомов водорода и молекулы водорода соответственно

монохроматического излучения должна соответствовать частоте вращения. Результатом излучения должно быть уменьшение энергии электрона и превращение круговой траектории движения в спираль. Конечным итогом такого процесса является падение электрона на ядро.

Чтобы устранить противоречия планетарной модели, Н. Бор постулировал квантовые условия для движения электронов в атоме. В соответствии с постулатом Бора стабильны только такие круговые орбиты, для которых момент количества движения оказывается кратным постоянной Планка $\hbar = h/(2\pi)$:

$$mvr = n\hbar,$$

где n — главное квантовое число, $n = 1, 2, 3, \dots$; $\hbar$ — постоянная Планка, $\hbar = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж · с.

Исходя из этого условия легко определить те энергетические уровни и радиусы стационарных орбит, которые может иметь электрон в атоме:

$$\mathcal{E}_n = -\frac{mZ^2e^4}{8\varepsilon_0^2\hbar^2} \frac{1}{n^2}; \quad r_n = \frac{\varepsilon_0\hbar^2}{\pi mZe^2} n^2. \quad (1.3)$$

Из формулы (1.3) следует, что энергия электронов в атомах должна быть квантованной, т.е. электроны могут занимать лишь вполне определенные энергетические уровни, находясь на которых они не излучают и не поглощают энергии. Все процессы излучения и поглощения энергии атомом связаны с переходами электронов с одного разрешенного уровня на другой, с одной стационарной орбиты на другую. Дискретный характер энергетических состояний электронов в атомах подтверждается многочисленными экспериментами по изучению спектров излучения и поглощения света различными газами, находящимися в атомарном состоянии.